

UTILISATION THERMIQUE DES EAUX SUPERFICIELLES

POTENTIEL DES LACS ET RIVIÈRES SUISSES

Les eaux superficielles suisses renferment d'immenses réserves d'énergie thermique renouvelable, dont une fraction peut servir à chauffer et refroidir les infrastructures proches. Cet article présente une estimation du potentiel thermique des principaux lacs et rivières suisses, compare ce potentiel à la demande régionale et résume les considérations et difficultés techniques inhérentes à l'utilisation de cette énergie thermique.

Adrien Gaudard; Martin Schmid, Eawag; Alfred Wüest, Eawag et EPFL*

ZUSAMMENFASSUNG

THERMISCHE NUTZUNG VON OBERFLÄCHENGEWÄSSERN – POTENZIAL DER SCHWEIZER SEEN UND FLÜSSE

Seen und Flüsse können als erneuerbare Wärmequellen zum Heizen und Kühlen von Gebäuden, Infrastrukturanlagen und industriellen Prozessen genutzt werden. So liessen sich erhebliche Einsparungen an fossilen Brennstoffen und Strom erzielen, ein wichtiger Schritt in Richtung Energiewende. Es würde auch die lokale Versorgung mit positiven Nebeneffekten für die Wirtschaft fördern. In der Schweiz liegen die meisten Agglomerationen an Seen und Flüssen. Unter Berücksichtigung der möglichen Auswirkungen werden die Grenzen der thermischen Nutzung bestimmt und das Potenzial der wichtigsten Oberflächengewässer abgeschätzt. In den meisten der betrachteten Fälle übersteigt das Potenzial bei weitem die maximale regionale Nachfrage, was die Möglichkeit einer breiteren Nutzung nahelegt, die bis zu 40% des schweizerischen Wärme- und Kältebedarfs abdecken könnte. Äußere Faktoren erschweren die thermische Nutzung von Gewässern, im Falle des Heizens vor allem die geringe Wirtschaftlichkeit verglichen mit fossilen Brennstoffen. Um ein solches System zu installieren, braucht es in der Regel eine lange Voruntersuchungs- und Planungsphase sowie hohe Investitionen. Zudem können Probleme beim Betrieb (z. B. wegen der Temperatur oder Zusammensetzung des verwendeten Wassers) auftreten. Die thermische Nutzung von Seen und Flüssen eignet sich besonders für große Anlagen mit langfristiger Perspektive.

INTRODUCTION

En Suisse, la consommation énergétique finale s'élève à environ 850 PJ (pétajoule = 10^{15} J) par an [1]. Presque la moitié de ce total, soit 400 PJ, est utilisée pour chauffer bâtiments, eau et procédés industriels [2], et il est estimé que cette énergie de chauffage provient à 80% de combustibles fossiles (principalement gaz et mazout, brûlés en chaudière) [3]. Il existe pourtant de nombreuses sources de chaleur alternatives (*tab. 1*) [4].

Dans l'objectif de réduction des émissions de CO₂, le remplacement progressif des combustibles fossiles par ces autres sources d'énergie est essentiel. La réutilisation de nos rejets thermiques, ainsi que l'utilisation de la chaleur ambiante, sont autant de solutions écologiques et orientées vers l'avenir, et permettent une production d'énergie locale et durable. La valorisation de la chaleur des sources à basse température (c'est-à-dire la chaleur ambiante ou les eaux usées) requiert l'utilisation de pompes à chaleur, qui élèvent le niveau de température pour satisfaire les besoins de l'utilisateur. Les pompes à chaleur nécessitent une part d'énergie externe (souvent de l'électricité), qui représente typiquement 20 à 35% de la chaleur produite.

Les besoins en refroidissement en Suisse s'élèvent actuellement à environ 70 PJ (sans considérer le refroidissement des centrales nucléaires), dont la majorité est produite par des climatiseurs électriques [7]. Or, l'environnement peut également être utilisé

* Contact: adrien.gaudard@eawag.ch

Type	Source	Température type
Rejets thermiques d'origine humaine	Centrales thermiques/nucléaires	> 80 °C
	Usines d'incinération	> 80 °C
	Procédés industriels	Variable
	Eaux usées [5, 6]	5–20 °C
Chaleur ambiante renouvelable	Lacs et rivières	4–20 °C
	Nappes phréatiques	6–15 °C
	Sol (géothermie)	0–100 °C
	Air	0–30 °C

Tab. 1 Sources de chaleur pouvant remplacer les carburants fossiles pour le chauffage.

Wärmequellen für Heizzwecke, die fossile Brennstoffe ersetzen können.

comme puits de chaleur, c'est-à-dire comme source de froid. Les lacs, rivières alpines, nappes phréatiques et le sol ont globalement en été une température nettement plus basse que l'air. Souvent, ces sources permettent un refroidissement direct sans utilisation de climatiseurs, résultant en de considérables économies d'électricité.

Cet article se concentre sur l'utilisation thermique des lacs et des rivières. Ceux-ci peuvent offrir très localement de grandes quantités d'eau qui, de par sa forte capacité thermique, consiste en un stockage de chaleur très efficace. La température des eaux superficielles est par ailleurs plus stable que celle de l'air.

UTILISATION THERMIQUE DES LACS ET RIVIÈRES

L'extraction de chaleur ou de froid d'un lac ou d'une rivière implique une prise d'eau, un circuit primaire où circule l'eau captée et (souvent) un circuit secondaire qui amène le fluide

caloporteur¹ aux utilisateurs. Pour le chauffage, des pompes à chaleur (PAC) sont utilisées et le fluide de chauffage circule généralement dans un circuit tertiaire, qui est soit centralisé (un seul pour tous les utilisateurs) soit décentralisé (un pour chaque utilisateur). Des échangeurs de chaleur permettent le transfert de chaleur entre les différents circuits. Le diagramme de la *figure 1* exemplifie un tel système. Le savoir technique est bien implémenté en Suisse, cependant relativement peu d'installations de taille importante (> 2 MW) sont en fonctionnement. L'utilisation thermique s'accompagne d'un rejet d'eau à une température modifiée: plus chaude dans le cas de l'utilisation pour du refroidissement, plus froide dans le cas du chauffage. Ce rejet thermique se fait souvent dans le même corps d'eau où l'eau est captée. La température influence les procédés physiques, chimiques et biologiques dans les corps d'eau; ainsi, un rejet thermique peut potentiellement modifier les conditions de vie des organismes. Les possibles impacts pour l'écosystème aquatique ont été résumés dans un précédent article [9]. Les réchauffements sont particulièrement critiques, car ils peuvent accentuer la pression déjà exercée par le changement climatique sur les écosystèmes. Les fonctions écologiques des eaux superficielles ne devraient pas être perturbées. Par exemple, la migration des poissons en rivière et le mélange profond des lacs doivent être garantis [9].

En Suisse, la plupart des agglomérations sont situées à proximité directe des grands lacs et rivières. L'utilisation thermique des eaux superficielles est ainsi envisageable dans de nombreuses situations. Dans cette étude, le potentiel thermique des principaux lacs et rivières suisses est estimé et mis en relation avec la demande régionale maximale en chauffage et en refroidissement. Ces estimations sont le résultat de calculs simplifiés et

¹ Généralement de l'eau. Du CO₂ pressurisé (un réfrigérant) est également une option viable [8].

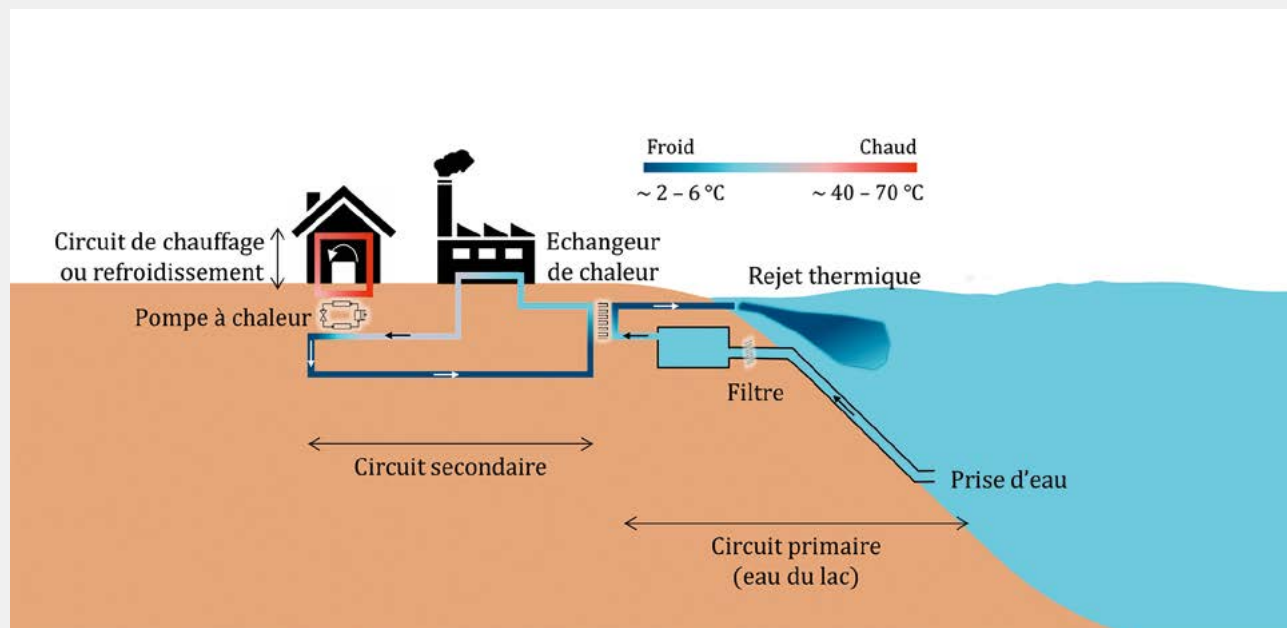


Fig. 1 Exemple d'un système d'utilisation thermique d'un lac. Dans cet exemple, l'eau du lac est utilisée pour refroidir une industrie et ensuite pour chauffer une maison de manière décentralisée. Ici, le chauffage est dominant; l'eau rejetée est donc plus froide que l'eau captée.

Beispiel einer Anlage für die thermische Nutzung aus einem See. In diesem Beispiel wird Seewasser genutzt, um dezentral eine Industrieanlage zu kühlen und anschliessend ein Haus zu heizen. Hier ist die Heizung dominant, weswegen das Rückgabewasser kälter als das gefasste Seewasser ist.

donnent un ordre de grandeur; pour une utilisation thermique approchant cet ordre de grandeur, une étude plus poussée doit être entreprise, tenant compte des propriétés spécifiques du corps d'eau concerné.

DEMANDE

Pour chaque lac et rivière considéré, la demande régionale maximale a également été estimée (incluant les ménages, l'industrie et les services). Celle-ci se base sur un décompte des habitants vivant dans les communes se situant en bordure du lac ou de la rivière correspondante. Connaissant la demande totale en chauffage et refroidissement du pays (voir *Introduction*), soit pour 8 millions d'habitants, la demande régionale peut être inférée. Cette méthode surestime fortement la demande réelle. En effet, dans beaucoup de communes en bordure d'un corps d'eau, de nombreux habitants sont situés trop loin de celui-ci pour qu'un raccordement soit réaliste. Ce sont tout d'abord les zones à forte densité et à proximité immédiate d'un lac ou d'une rivière qui peuvent bénéficier d'une utilisation thermique. La demande totale autour des lacs est estimée à 135 PJ de chaleur et 25 PJ de froid, autour des rivières à 205 PJ de chaleur et 37 PJ de froid (certaines communes étant assignées à la fois à un lac et à une rivière).

POTENTIEL

La méthode utilisée pour estimer le potentiel des lacs et rivières est décrite ci-dessous. Le potentiel est estimé pour chaque mois (si possible) ou pour chaque saison, par période de trois mois: décembre-janvier-février (hiver), mars-avril-mai (printemps), juin-juillet-août (été), septembre-octobre-novembre (automne). Les potentiels cumulés sur l'année sont présentés ici.

Le potentiel calculé E est l'énergie thermique provenant du lac ou de la rivière correspondante. Dans le cas du refroidissement, une utilisation directe (*free cooling*) est supposée. Dans le cas du chauffage, une part de chaleur supplémentaire E_{PAC} provient de l'électricité fournie aux pompes à chaleur:

$$E_{PAC} = \frac{1}{COP-1}$$

Le coefficient de performance COP [-] d'une pompe à chaleur est estimé par la formule suivante [10]:

$$COP \cong 0.5 \frac{T_o + 273.15}{T_o - T_s}$$

T_o [°C]: température de sortie de la pompe à chaleur (fixée à 50 °C)

T_s [°C]: la température de la source (l'eau du lac ou de la rivière),

supposant une perte de 1 °C due aux échangeurs de chaleur

Le potentiel final est obtenu en additionnant E et E_{PAC} .

LACS

Pour l'utilisation thermique d'un lac, on considère que la température d'un certain volume d'eau V [m³] peut être modifiée d'une certaine valeur ΔT [°C] pendant une période donnée.

Le potentiel (en [J]) est alors donné par la formule suivante, avec $c_{eau} \approx 4.2 \times 10^6$ J/(m³ × °C) la capacité thermique volumique de l'eau:

$$E_{lac} = c_{eau} V \Delta T$$

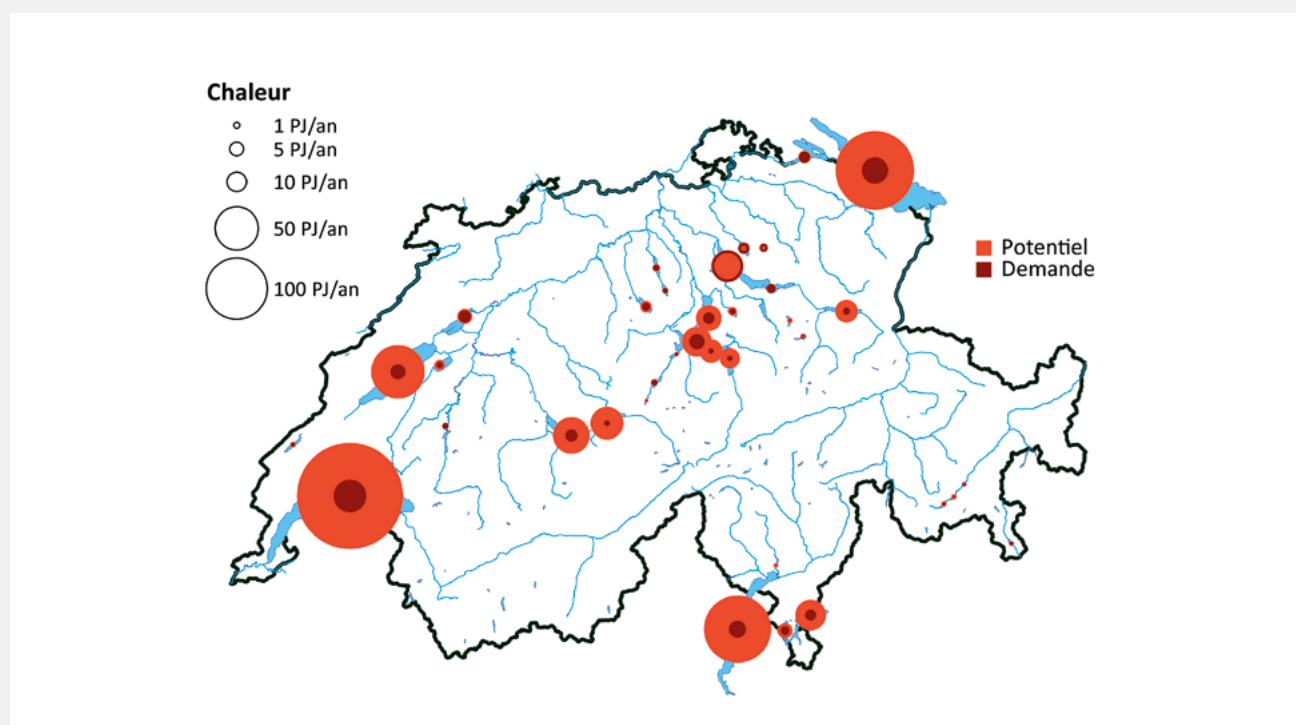


Fig. 2 Potentiel des lacs suisses pour l'extraction de chaleur, et demande régionale maximale. La surface des cercles est proportionnelle à la valeur correspondante.

Potenzial der Schweizer Seen für Wärmeextraktion und regional maximale Nachfrage. Die Fläche der Kreise ist proportional zum entsprechenden Wert.

Le volume disponible V est défini de manière à limiter les impacts sur le lac, en particulier à ne pas renforcer ou prolonger la stratification estivale [9], et ainsi à ne pas perturber le mélange hivernal. Ainsi, dans les lacs qui ne se mélangent pas souvent (dits oligomictiques) ou dont le mélange est essentiel à l'écosystème profond, V est défini afin d'éviter un réchauffement des couches supérieures ou un refroidissement des couches profondes en automne. De plus, un réchauffement des couches supérieures ou de la thermocline est évité pour tous les lacs au printemps et en été.

Les modifications de température maximales tolérées sur une année entière sont définies comme suit: $\Delta T = -1,0\text{ °C}$ pour l'extraction de chaleur, $\Delta T = +0,5\text{ °C}$ pour l'extraction de froid. Ces modifications de température ne devraient en général pas donner lieu à des températures qui ne surviennent pas naturellement dans le lac.

En tout, 36 lacs ou bassins ont été considérés, représentant les principaux lacs suisses suffisamment grands et profonds (fig. 2 et fig. 3), mais excluant les réservoirs de haute montagne. Les données de température proviennent des organes cantonaux responsables.

RIVIÈRES

Pour l'utilisation thermique d'une rivière, on considère que la température d'un certain débit d'eau Q [m^3/s] peut être continuellement modifiée d'une certaine valeur ΔT [$^{\circ}\text{C}$].

Le potentiel mensuel (en [J]) est alors donné par la formule suivante, avec t_{mois} [s] la durée du mois considéré:

$$E_{\text{rivière}} = c_{\text{eau}} Q \Delta T t_{\text{mois}}$$

Les grandes rivières sont divisées en plusieurs segments, et le potentiel est estimé à plusieurs emplacements le long de leur cours. Le débit disponible Q est défini comme le débit moyen de la rivière à l'emplacement correspondant. S'il y a d'autres emplacements en amont de la même rivière (ou sur ses affluents), alors le débit de ceux-ci est soustrait, afin d'éviter un usage multiple de la même eau.

La modification de température acceptable est définie selon l'ordonnance sur la protection des eaux pour les zones à truites: $\Delta T = -1,5\text{ °C}$ pour l'extraction de chaleur, $\Delta T = +1,5\text{ °C}$ pour l'extraction de froid. Étant donné que les réchauffements sont en général plus critiques que les refroidissements et étant donné que les impacts écologiques dépendent entre autres des espèces présentes et de la saison, ces valeurs limites ne sont pas toujours raisonnables. C'est pourquoi l'ordonnance sur la protection des eaux exige en plus que la température ne soit pas modifiée «dans une mesure telle que sa capacité d'auto-épuration soit réduite ou que la qualité de l'eau soit insuffisante pour permettre le développement de biocénoses spécifiques au cours d'eau». Ces exigences peuvent conduire à une limitation supplémentaire de l'utilisation thermique d'une rivière, ce qui ne peut être considéré ici pour l'estimation du potentiel.

En tout, 35 rivières à 57 emplacements ont été considérées, représentant la majorité du réseau hydrologique suisse (fig. 4 et fig. 5). Les données de débit et de température proviennent de l'Office fédéral de l'environnement.

REMARQUES GÉNÉRALES

L'estimation du potentiel des eaux superficielles souligne les réserves gigantesques d'énergie thermique en jeu. Les potentiels calculés sont souvent supérieurs à la demande régionale maximale, excepté dans les zones très densément peuplées

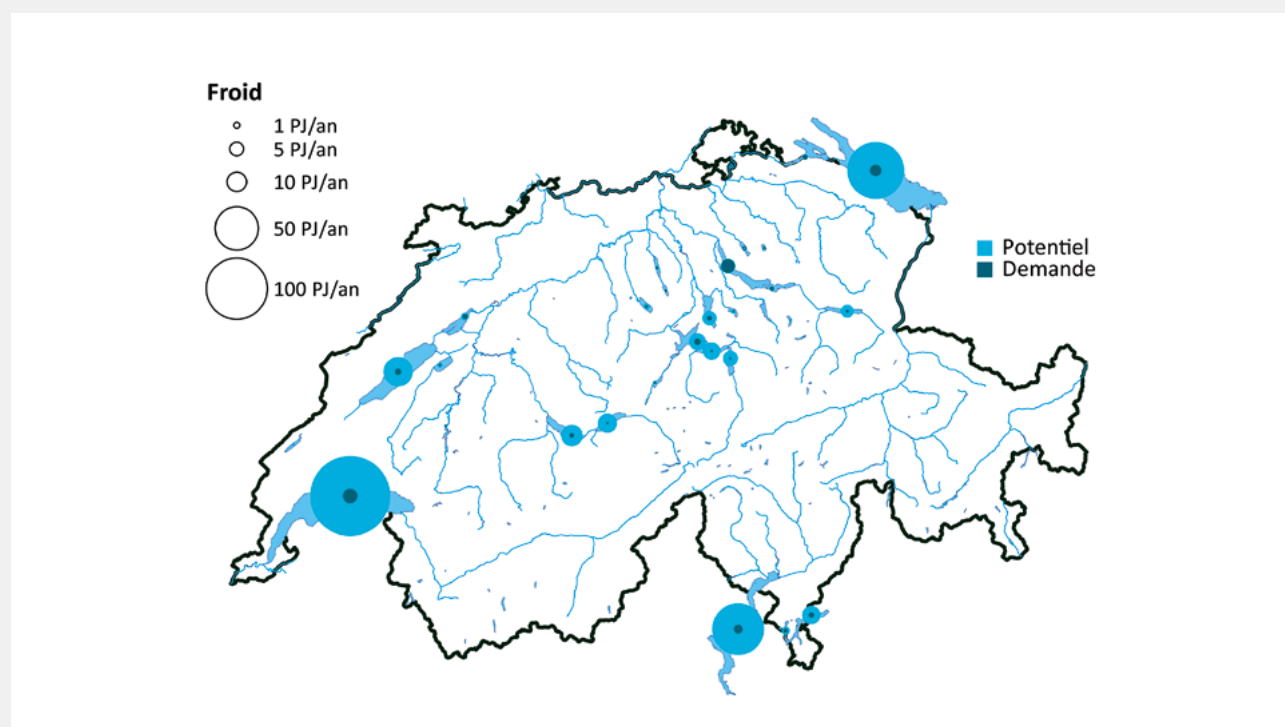


Fig. 3 Potentiel des lacs suisses pour l'extraction de froid, et demande régionale maximale. La surface des cercles est proportionnelle à la valeur correspondante.

Potenzial der Schweizer Seen für Kälteextraktion und regional maximale Nachfrage. Die Fläche der Kreise ist proportional zum entsprechenden Wert.

telles que la région zurichoise. Le potentiel en chaleur est par exemple nettement inférieur à la demande pour les lacs de

Greifen, de Pfäffikon et de St. Moritz, ainsi que pour les rivières de plaine traversant les grandes villes. En supposant

qu'il est possible de couvrir la moitié de la demande estimée pour chaque lac et rivière (si le potentiel correspondant est

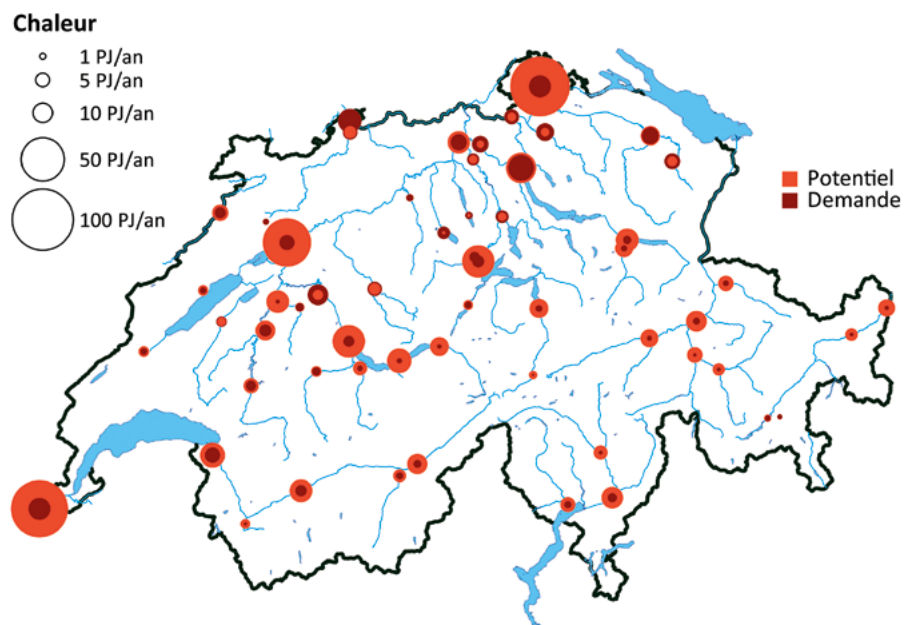


Fig. 4 Potentiel des rivières suisses pour l'extraction de chaleur, et demande régionale maximale. La surface des cercles est proportionnelle à la valeur correspondante.

Potenzial der Schweizer Flüsse für Wärmeextraktion und regional maximale Nachfrage. Die Fläche der Kreise ist proportional zum entsprechenden Wert.

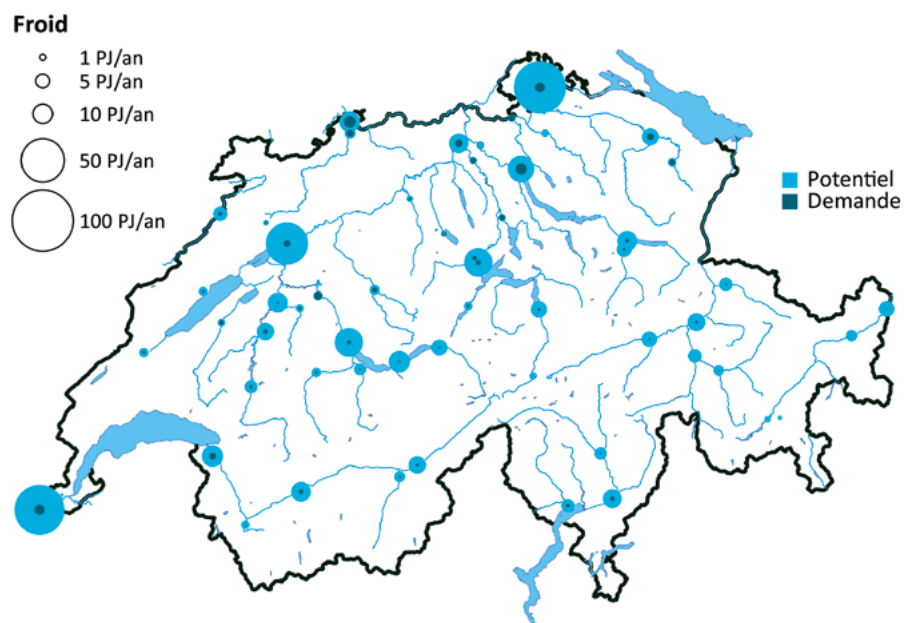


Fig. 5 Potentiel des rivières suisses pour l'extraction de froid, et demande régionale maximale. La surface des cercles est proportionnelle à la valeur correspondante.

Potenzial der Schweizer Flüsse für Kälteextraktion und regional maximale Nachfrage. Die Fläche der Kreise ist proportional zum entsprechenden Wert.

suffisant), on obtient une quantité de chaleur totale de 160 PJ, et de froid de 30 PJ. Ceci représente environ 40% des besoins en Suisse.

Les impacts d'une utilisation thermique (chaleur et froid) correspondant à la moitié de la demande estimée ont été modélisés pour le Lac de Constance et le Lac de Zurich. Dans le Lac de Constance, les variations de température² sont à peine mesurables (<0,05 °C), dans le Lac de Zurich, elles atteignent 0,5 °C. Les lacs sont plutôt refroidis, la demande en chaleur étant plus importante que celle en froid.

Il faut prendre en compte le fait que la demande varie fortement au fil de l'année, ce qui ne peut pas être représenté par les valeurs annuelles. En effet, les besoins en chauffage sont faibles en été, alors que ceux en refroidissement sont presque entièrement concentrés sur cette saison. Ainsi par exemple, même si le potentiel annuel pour le refroidissement est supérieur à la demande annuelle, il se peut que la situation soit problématique en été. En pratique, tous les corps d'eau ne sont pas adaptés pareillement à une utilisation thermique. Les rivières à régime glaciaire ou nival (c'est-à-dire surtout nourries par la fonte de glace et de neige) sont souvent trop froides en hiver pour une extraction de chaleur efficace. À l'opposé, la température des rivières de basse altitude en aval d'un lac peut occasionnellement être trop haute pour qu'une extraction de froid soit raisonnable ou même autorisée. Dans les lacs, la température des couches de surface est certes plus élevée que celle des couches profondes, mais aussi plus variable. On peut ainsi définir des emplacements optimaux pour l'utilisation thermique (tab. 2). Dans les rivières dont le débit d'étiage est faible, ainsi que dans les lacs très peu profonds, une source de chaleur ou de froid alternative peut être considérée.

Pour le refroidissement d'utilisateurs situés à proximité directe d'un lac profond et de son émissaire, il existe une possibilité supplémentaire. De l'eau froide des couches profondes du lac peut être utilisée en été et rejetée (plus chaude) directement dans l'émissaire. Il faut s'assurer que le rejet soit plus froid ou à la même température que l'émissaire pour ne pas causer une augmentation de sa température, non souhaitable en été. Le potentiel de cette technique est alors limité par l'abaissement des couches de surface, qui provoque

	Lacs	Rivières
Extraction de chaleur (Octobre-Mars)	À 15-40 m de profondeur (Temp.: 4-10 °C)	En aval d'un lac de plaine (Temp.: 4-12 °C)
Extraction de froid (Juin-Août)	À 30-70 m de profondeur (Temp.: 4-8 °C)	À bassin versant alpin (Temp.: 2-15 °C)

Tab. 2 Emplacement optimal pour la prise d'eau selon le corps d'eau et l'utilisation thermique, et plage de température typique.

Optimale Lage für die Wasserfassung je nach Gewässer und thermischer Nutzung sowie typischer Temperaturbereich.

un réchauffement de la thermocline, ce qui peut avoir des impacts sur le lac (p.ex. retardement du mélange hivernal) [9].

Le changement climatique affectera non seulement la demande en chaleur et en froid, mais aussi le potentiel des lacs et rivières. D'ici 2050, il est projeté que les besoins en chauffage baisseront d'au moins un quart (également grâce à une meilleure isolation des bâtiments), alors que ceux en refroidissement pourraient presque doubler (de plus en plus d'utilisateurs voulant s'équiper) [11, 12]. L'évolution du potentiel se fera dans la direction opposée mais sera de bien moindre mesure.

DIFFICULTÉS ET RENTABILITÉ

Le grand potentiel thermique des lacs et rivières n'est actuellement que peu utilisé. Différentes raisons expliquent cela: un manque de prise de conscience des possibilités, un manque d'expérience, des obstacles inhérents aux propriétés de ces corps d'eau (tab. 3), des difficultés de réalisation et d'exploitation, ainsi que parfois une trop faible rentabilité.

Lors de l'exploitation, la croissance d'organismes aquatiques (p.ex. biofilm, moules) dans le circuit primaire est souvent observée. Le problème peut notamment être critique dans les échangeurs de chaleur, où un biofilm augmente la résistance à l'écoulement et réduit l'efficacité de l'échange [13]. Différents facteurs augmentent le risque d'une telle croissance:

- Prise d'eau peu profonde
- Eau riche en nutriments
- Réchauffement de l'eau pompée
- Zones à faible courant dans le circuit primaire ou dans les échangeurs de chaleur
- Revêtement de qualité inférieure et/ou par un matériau inapproprié [14].

Les échangeurs de chaleur à plaques sont plus souvent colonisés que ceux tubulaires, notamment si les plaques sont peu espacées, offrant une surface de contact

plus importante. Il a été démontré qu'une augmentation de la vitesse de l'eau (même périodique) peut lutter efficacement contre la formation de biofilm [14]. Un nettoyage mécanique ponctuel est tout de même souvent nécessaire. Quant à elles, les moules zébrées, dont les larves peuvent passer les filtres, sont généralement absentes sous 20 m de profondeur (30 m au Tessin). Dans le futur cependant, il faudra de plus en plus prendre en compte la présence de la moule Quagga, qui forme des colonies à plus grande profondeur [15].

Lors de la planification d'une utilisation thermique d'un corps d'eau, les autres usages à proximité doivent être considérés [16]. Il s'agit notamment de l'activité des pêcheurs, de la présence d'autres tuyaux (p.ex. prise d'eau potable), ou encore de la présence de câbles posés ou enterrés.

La rentabilité de l'utilisation thermique d'un corps d'eau est l'obstacle principal à la généralisation de cette technique. Un nouveau système nécessite d'importants investissements (pré-études et planification, pose de la prise d'eau, construction d'un réseau thermique, etc.) et génère des coûts d'exploitation variables (énergie pour les pompes à chaleur, révisions et nettoyages, redevances de pompage, etc.). Pour l'extraction de chaleur, le coût actuel des carburants fossiles fait qu'un amortissement n'est possible qu'après une dizaine d'années, dans le meilleur des cas. La couverture des pics de consommation par un combustible améliore la rentabilité, le système étant alors typiquement dimensionné pour que 80 à 95% des besoins soient couverts de manière renouvelable³. Pour le refroidissement en revanche, les coûts d'exploitation sont en général bien moindres que ceux des solutions alternatives (p.ex. climatiseurs électriques), permettant un amortissement rapide.

² Du profil de température moyen le long de l'année.

³ Supposant qu'à côté de la chaleur du corps d'eau, l'électricité des pompes à chaleur est aussi renouvelable.

Situation	Mesure(s)	Exemple(s)
Lac dans lequel le mélange vertical pourrait être facilement perturbé	Eviter de chauffer les couches de surface ou de refroidir les couches profondes, spécialement en automne et en hiver [17]	Lac Léman
Lac très eutrophe ou riche en nutriments	Eviter le rejet d'eau riche en nutriments (p.ex. des couches profondes) dans les couches de surface [18]	Lac de Baldegg, Lac de Lugano, Lac de Zoug
Bassin isolé du reste du lac	Considérer le bassin séparément (notamment la possibilité d'accumulation de chaleur) [19]	Bassin de Lüscherz (Lac de Bienne)
Lac (ou zone d'un lac) sujet à un fort impact du vent	Analyse de l'impact du vent sur la température à la prise d'eau [20, 21]	Lac Léman
Pentes raides dans le lac (risque de glissement sous-lacustre)	Construction de la prise d'eau hors de portée des zones à risque [22]	Lac de Bienne, Lac de Lugano
Berges trop instables pour un forage (p.ex. gravier)	Relevé géologique et adaptation de la technique de pose de la prise d'eau	Lac des Quatre Cantons
Rejet thermique dans une rivière juste avant que celle-ci se jette dans un lac	Analyse de l'impact sur les apports en chaleur, nutriments, oxygène et sédiments de la rivière dans le lac [23, 24]	Yverdon-les-Bains (Lac de Neuchâtel), Mühleberg (Lac de Bienne)

Tab. 3 Situations types pouvant causer des difficultés pour l'utilisation thermique d'un lac ou d'une rivière.

Typische Gegebenheiten, die zu Schwierigkeiten bei der thermischen Nutzung eines Sees oder Flusses führen können.

La période d'amortissement est souvent supportable pour les services publics, mais trop longue pour l'économie privée. Par ailleurs, un grand système peut potentiellement mieux optimiser le rapport performance/coûts par rapport à un petit système. L'utilisation thermique des lacs et rivières convient ainsi particulièrement à des projets d'envergure soutenus par des organes publics (cantons, communes, villes).

Dans le cas d'un réseau de chauffage à distance, la faisabilité d'un tel système dans une zone donnée peut être évaluée en estimant la densité énergétique de la demande. Des valeurs annuelles minimales de 2 MWh par mètre de tracé ou de 300 MWh par hectare sont utilisées comme références [25].

Finalement, des contributions externes peuvent améliorer la rentabilité d'un système. Par exemple, la fondation KLIK offre de telles contributions au travers des programmes d'encouragement «Réseaux thermiques» et «Froid écologique» [26]. Des aides cantonales et régionales existent parfois aussi.

et des rivières est considérable, souvent au-dessus de la demande – à l'exception de certaines zones très densément peuplées. En pratique, certaines rivières ne sont pas utilisables efficacement toute l'année, leur température pouvant être soit trop basse en hiver soit trop haute en été. Grâce à une conception réfléchie des systèmes d'utilisation thermique et une coordination entre les différents acteurs, les possibles impacts sur les écosystèmes peuvent être évités ou suffisamment minimisés [9].

L'exploitation du potentiel disponible est ainsi plutôt limitée par des critères économiques (rentabilité) et par les exigences légales. De plus, l'utilisation d'un corps d'eau implique différents intérêts (production d'énergie renouvelable, protection des eaux, installation d'infrastructures, etc.) parfois contradictoires et portés par différentes entités (cantons, communes, fournisseurs et consommateurs d'énergie, associations de défense de l'environnement, compagnies privées, etc.). Ceci rend le projet global complexe à mener, augmentant les coûts et rallongeant les phases de planification et de réalisation. Sur le long terme et avec une bonne planification, l'utilisation thermique d'un corps d'eau peut être économiquement et écologiquement viable.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] BFE (2017): Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2016 – Statistique globale suisse de l'énergie 2016. Bundesamt für Energie, 805.006.16
- [2] Prognos AG et al. (2015): Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000–2014 nach Verwendungszwecken. Bundesamt für Energie (BFE)
- [3] Eicher, H. et al. (2014): Erneuerbare Energien –

- Umweltfreundliche Versorgung. EnergieSchweiz
- [4] Eicher & Pauli (2014): Livre blanc sur le chauffage à distance en Suisse – Stratégie ASCAD, perspectives à long terme de l'efficacité énergétique renouvelable dans le chauffage de proximité et à distance en Suisse. Association suisse du chauffage à distance (ASCAD), Rapport final, phase 2: analyse SIG et étude des potentiels 12.3156.1
- [5] Müller, E. A.; Dietler, M. (2015): Abwasser als Energiequelle: Abwasser zum Heizen und Kühlen – Potenzial, Umsetzung und Wirtschaftlichkeit. Aqua & Gas, 7/8_2015: 50–57
- [6] Ernst Basler+Partner (2015): Efficacité des ressources dans les STEP – Analyse des potentiels et conditions-cadres pour une augmentation de l'utilisation des ressources. VSA
- [7] Dumortier, R. et al. (2012): Elektrizitätsbedarf fürs Kühlen in der Schweiz. EnergieSchweiz, Zürich
- [8] Henchoz, S. (2016): Potential of refrigerant based district heating and cooling networks. PhD, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne
- [9] Gaudard, A. et al. (2017): Utilisation thermique des eaux superficielles: aperçu des éventuels impacts physiques et écologiques. Aqua & Gas, 3/2017: 44–49
- [10] Zogg, M. (2009): Wärmepumpen. «Geothermie – die Energie des 21. Jahrhunderts». Zertifikatslehrgang ETH
- [11] CH2014-Impacts (2014): Toward Quantitative Scenarios of Climate Change Impacts in Switzerland. OcCR, FOEN, MeteoSwiss, C2SM, Agroscope and ProClim, Bern, Switzerland
- [12] OcCC (2007): Klimaänderung und die Schweiz 2050: Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft. Organe consultatif sur les changements climatiques, Bern
- [13] Kazi, S. N. (2012): Fouling and fouling mitigation on heat exchanger surfaces. INTECH Open Access Publisher
- [14] Wanner, O. (2004): Wärmerückgewinnung aus Abwassersystemen: Schlussbericht. Eawag
- [15] Ventura, L. D. et al. (2016): Overland transport of

POUR PLUS D'INFORMATIONS

<https://thermdis.eawag.ch/fr>

CONCLUSIONS

En considérant les objectifs énergétiques – un approvisionnement durable en énergie, une réduction de la consommation ainsi que des émissions de CO₂ –, l'utilisation des corps d'eau comme sources de chaleur et de froid est extrêmement attractive. En Suisse, le potentiel des lacs

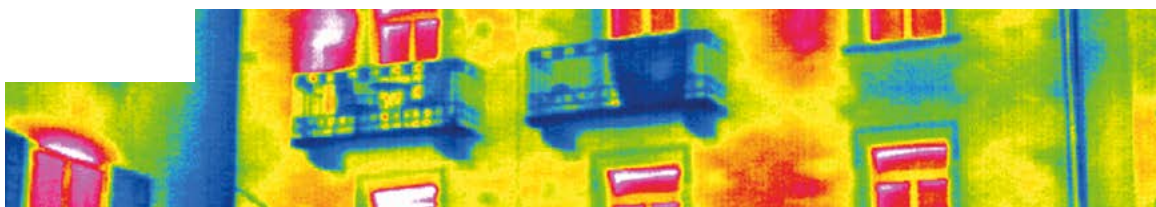
- recreational boats as a spreading vector of zebra mussel *Dreissena polymorpha*. *Biol. Invasions*. 18: 1451–1466
- [16] BFE (2017): Nutzung von Oberflächengewässern für thermische Netze. *EnergieSchweiz*
- [17] Fink, G. et al. (2014): Large lakes as sources and sinks of anthropogenic heat: Capacities and limits. *Water Resources Research* 50: 7285–7301
- [18] Jaun, L.; Schmid, M. (2006): Temperaturveränderungen und Phosphat-Eintrag durch Kühlwassernutzung und Wärmeentnahme am Zugersee. Eawag, Kastanienbaum
- [19] Wüest, A.; Fink, G. (2014): Potenzial zur Wärme- und Kühlenergienutzung aus dem Vierwaldstättersee: Machbarkeit. Eawag, Kastanienbaum
- [20] Gaudard, A. et al. (2014): Alternatives for the development of the EPFL water intake in Lake Geneva. EPFL, Lausanne, APHYS-14-1
- [21] Gaudard, A. (2016): Wärme- und Kältenutzung aus Brienzer-, Thuner- und Bielersee – Abschätzung des Potenzials und Beeinflussung der Seeökosysteme. Eawag, Kastanienbaum
- [22] Råman Vinnå, L. et al. (2017): Seewasserentnahme im Bielersee: gibt es eine ideale Position? *Aqua & Gas* 9/17: 14–20
- [23] Råman Vinnå, L. et al. (2017): Physical effects of thermal pollution in lakes. *Water Resources Research* 53: 3968–3987
- [24] Gaudard, A. (2016): Wärme- und Kältenutzung aus Sempacher- und Baldeggersee – Abschätzung des Potenzials. Eawag, Kastanienbaum
- [25] Eawag: PEAK-Kurs «Heizen und Kühlen mit Seen und Flüssen». Kastanienbaum, 08/11/2017
- [26] Vogelsanger, M. (2017): Einfach, schnell und planbar: Programm Wärmeverbünde. *Aqua & Gas* 9/2017: 97–100

eicher+pauli

Planer für Energie- und Gebäudetechnik

effizient+erneuerbar

... aus Erfahrung



Bern

bern@eicher-pauli.ch

Biel

biel@eicher-pauli.ch

Liestal

liestal@eicher-pauli.ch

Luzern

luzern@eicher-pauli.ch

Olten

olten@eicher-pauli.ch

Zürich

zuerich@eicher-pauli.ch

www.eicher-pauli.ch